

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Étude du processus de vibrofonçage d'un pieu en chambre d'étalonnage

## Study of pile vibrodriving process in a calibration chamber

T. Le Thiet, J. Canou & J.-C. Dupla

CERMES (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées/Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), Paris, France

### RÉSUMÉ

On présente dans cette communication les résultats d'une recherche destinée à mettre en évidence l'influence de paramètres significatifs sur le déroulement du processus de vibrofonçage d'un pieu, étudié à partir d'une modélisation physique du processus, réalisée en chambre d'étalonnage. On s'intéresse, en particulier, à l'influence des caractéristiques de chargement appliquées en tête de la sonde de vibrofonçage utilisée sur le déroulement du processus et on montre l'importance des phases de traction en tête sur le déroulement du processus.

### ABSTRACT

This communication presents the results of a research aimed at studying the influence of significant parameters on the vibrodriving process of a pile, based on a physical modelling of the process in a calibration chamber. The emphasis is put on the influence of parameters of loading applied on top of the vibrodriven probe on the process development and the influence of the amplitude of vibrations and presence of traction phases on the penetration of the probe is clearly shown.

### 1 INTRODUCTION

Le vibrofonçage est un procédé largement utilisé en génie civil pour installer différents types de pieux et de palplanches. C'est un processus dynamique très complexe qui dépend de nombreux paramètres tels que le type de sol rencontré, son état de saturation, les caractéristiques de l'inclusion à mettre en place ainsi que celles de la sollicitation vibratoire appliquée en tête de l'inclusion. Le succès de l'opération dépend d'une bonne optimisation de ces différents paramètres. Il existe encore de nombreux points d'interrogation concernant la compréhension des mécanismes contrôlant le processus de vibrofonçage et un Projet National "Vibrofonçage" a été initié en 2000 (Le Tirant et al., 1999), avec, pour objectif, une amélioration des connaissances dans ce domaine, en vue de perfectionner la technique, d'en accroître le développement et les utilisations. Le Projet National s'intéresse en particulier aux aspects relatifs à la vibrofonçabilité d'éléments tels que pieux et palplanches et à la capacité portante des pieux vibrofoncés, étudiée de manière comparative avec celle des pieux battus. Le Projet National comprend un volet expérimental important avec la réalisation et l'interprétation d'essais à l'échelle 1 sur site (Sieffert et Borel, 2004) ainsi que des essais de modélisation physique en laboratoire, et un volet théorique et numérique s'intéressant à la modélisation numérique du processus et à la mise au point d'un logiciel de prévision de la vibrofonçabilité des pieux (Sieffert, 2002).

En vue de mieux comprendre les mécanismes contrôlant le processus de vibrofonçage, le modèle physique développé dans le cadre du Projet National "Vibrofonçage" (Canou et Dupla, 1999 ; Le Thiet et al., 2003) a pour objectif principal de mettre en évidence et de quantifier, dans la mesure du possible, l'influence de paramètres significatifs du processus sur les observations expérimentales réalisées.

Très peu de travaux de modélisation physique ont été publiés dans la littérature. On peut, toutefois, faire référence aux travaux de Sieffert (2002, 2004) qui a étudié à partir des essais de vibrofonçage in situ, le comportement latéral et le comportement en pointe des inclusions tubulaires. On mentionne également les travaux réalisés à l'université de Houston (Vipulana-

dan et al., 1990 ; O'Neill et al., 1990 ; Wong et al., 1992), qui concernent l'étude au laboratoire, sur des modèles de pieux fermés ou ouverts, de l'influence de la granulométrie, de la densité et de l'état de consolidation du sol sur la vibrofonçabilité et la capacité portante des pieux foncés. En Allemagne, Cudmani et al. (2002) ont développé un nouveau modèle de comportement du sol, à partir de résultats en chambre d'étalonnage sur des modèles de pieux, pour la prédiction de la vibrofonçabilité des pieux dans les sols cohérents.

En ce qui concerne les travaux de référence plus généraux publiés sur le domaine, on pourra se référer aux publications de Gonin (1998), Holeyman (2002) et Viking (2002).

Après avoir présenté le dispositif d'essai développé dans le cadre de ce travail ainsi que la procédure expérimentale utilisée, on décrit les résultats d'un essai typique et l'on montre l'influence de certaines des caractéristiques de la sollicitation appliquée en tête de l'inclusion à vibrofoncer sur le déroulement du processus, en s'intéressant de manière plus spécifique à l'amplitude de la sollicitation et à la présence ou non de phases de traction lors de l'application de celle-ci, sur l'enfoncement de la sonde prototype utilisée.



Figure 1. Vue d'ensemble du dispositif d'essai

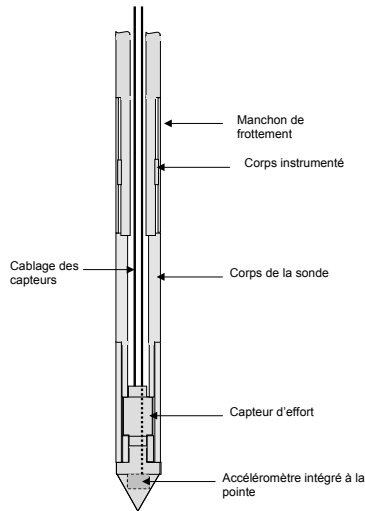


Figure 2. Schéma de principe de la sonde de vibrofonçage

## 2 DISPOSITIF ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Le dispositif d'essai se compose d'une chambre d'étalonnage permettant de reconstituer, par pluviation, et de mettre sous contrainte, des massifs de sable de 52 cm de diamètre et 70 cm de haut, le sable pouvant être saturé ou non. La chambre d'étalonnage est intégrée à un bâti de quatre colonnes équipé d'un vérin longue course pour assurer des opérations d'installation des inclusions (modèles de pieu, pénétromètres, etc.) et d'un servovérin hydraulique permettant de réaliser des chargements asservis en force ou en déplacement, dans le domaine monotone ou cyclique jusqu'à des fréquences maximales de l'ordre de 80 Hz. La figure 1 présente une vue d'ensemble du dispositif d'essai. Une sonde spécifique, appelée sonde de vibrofonçage, a été développée dans le cadre de ce travail. Cette sonde, conçue sur le principe d'un pénétromètre, de 10 cm<sup>2</sup> de section droite (diamètre de 36 mm), permet de réaliser la mesure, au cours d'une séquence de chargement, de la résistance en pointe mesurée grâce à un capteur d'effort équipant la pointe de la sonde et du frottement latéral unitaire mesuré sur un manchon de frottement instrumenté. La pointe est, de plus, équipée d'un accéléromètre qui permet d'enregistrer l'accélération instantanée au cours du processus. La figure 2 présente un schéma de principe de la sonde de vibrofonçage. L'acquisition des données pendant les essais est réalisée grâce à un dispositif d'acquisition rapide permettant de prendre en simultanément les mesures sur huit voies à une fréquence de 100 kHz.

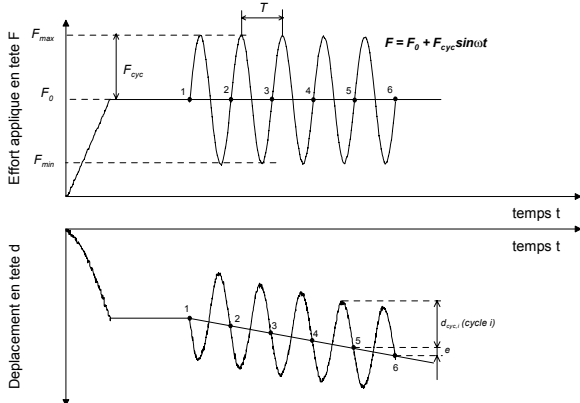


Figure 3. Paramètres caractérisant la sollicitation de vibrofonçage et la réponse

Plus qu'un modèle réduit d'essai de vibrofonçage (tel que l'on pourrait, par exemple, l'envisager en centrifugeuse), ce dispositif d'essai est destiné à étudier l'évolution de différentes grandeurs contrôlant le déroulement du processus, telles que, typiquement, le frottement local d'interface mesuré sur le manchon de frottement ou la résistance en pointe mobilisée, et à quantifier, dans la mesure du possible, l'influence de paramètres significatifs sur l'évolution de ces grandeurs au cours du déroulement du processus.

Après reconstitution et mise sous contrainte du massif de sable à l'indice de densité souhaité, la sonde est préalablement installée dans le massif jusqu'à une profondeur d'environ 40 cm grâce au vérin de longue course. La sollicitation de vibrofonçage consiste à appliquer ensuite, à l'aide du servovérin, un effort statique  $F_0$  simulant un poids mort appliqué en tête de l'inclusion, puis la sollicitation sinusoïdale, autour de  $F_0$ , caractérisée par son amplitude  $F_{cyc}$  et sa fréquence  $f$ . La figure 3 présente les paramètres caractérisant la sollicitation de vibrofonçage étudiée.

## 3 RÉSULTAT TYPIQUE

La figure 4 présente un résultat typique obtenu dans un massif de sable de Fontainebleau saturé. Ce sable, sur lequel ont été réalisés l'ensemble des essais de cette étude, est un sable fin de référence, composé essentiellement de silice, à grains subarrondis et à granulométrie uniforme ( $D_{50} = 200 \mu\text{m}$ ). L'essai présenté a été réalisé dans un massif relativement dense ( $I_D = 0,79$ ), soumis à un état de consolidation du type  $K_0$  ( $\sigma_v = 125 \text{ kPa}$  et  $\sigma_h = 50 \text{ kPa}$ ,  $K_0 = 0,40$ ). La figure 4a présente la sollicitation appliquée, avec, tout d'abord, une force statique initiale  $F_0$  de 2,1 kN appliquée, suivie de la vibration caractérisée par une amplitude  $F_{cyc}$  de 1,8 kN et une fréquence de 30 Hz. 3600 cycles ont été appliqués pour cette séquence, correspondant à une durée d'essai de 120 secondes.

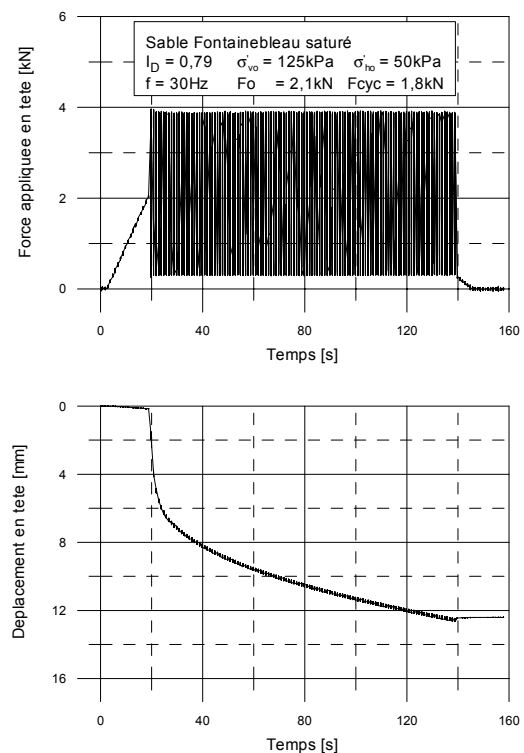


Figure 4. Résultats d'un essai typique de vibrofonçage : (a) sollicitation appliquée en tête de la sonde ; (b) courbe d'enfoncement de la sonde

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4b sous forme de la courbe d'enfoncement de la sonde en fonction du temps. On observe une phase initiale d'enfoncement relativement rapide, suivie d'une phase où la vitesse d'enfoncement diminue sensiblement, puis une phase où la vitesse semble se stabiliser à une valeur relativement faible. À la fin de la séquence, la sonde continue de s'enfoncer et l'on n'a pas encore atteint le refus.

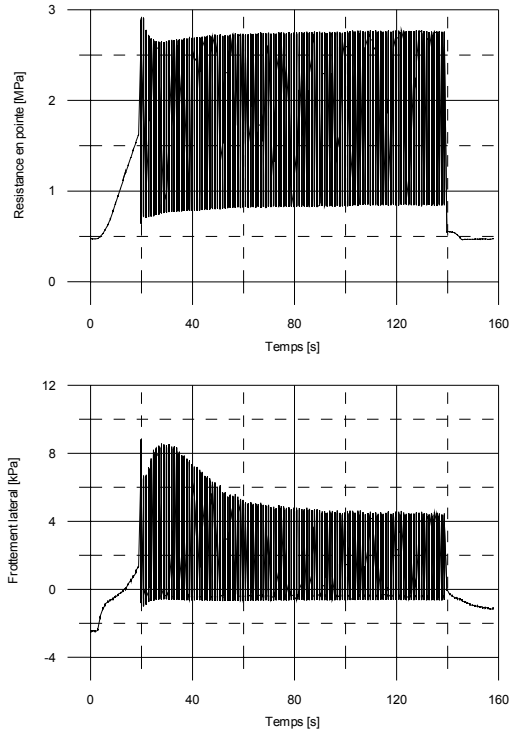


Figure 5. Résultats d'un essai typique : frottement local et résistance en pointe mobilisés au cours de la séquence

La figure 5 présente les résultats du même essai en termes de valeurs instantanées de la résistance en pointe et du frottement latéral mobilisés lors de la séquence. On met en particulier en évidence une diminution nette, avec le nombre de cycles appliqués, du frottement maximal mobilisé sur chaque cycle et, inversement, une augmentation de la valeur maximale de la résistance en pointe mobilisée sur chaque cycle.

#### 4 INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA VIBRATION

L'amplitude de la vibration appliquée en tête de l'inclusion s'avère être un paramètre important qui conditionne, pour une bonne part, le succès de l'opération de vibrofonçage. Elle constitue une des caractéristiques principales des vibreurs et elle est directement liée à la puissance du vibreur. On a donc cherché à mettre en évidence, sur notre dispositif, l'influence de ce paramètre en réalisant des séquences de vibration successives dans le même massif caractérisées par des amplitudes de vibration croissantes. Les résultats sont présentés sur la figure 6, en termes des signaux des sollicitations appliquées et des courbes d'enfoncement correspondantes. Onze séquences successives ont été appliquées, pour une même valeur de la force statique initiale ( $F_0 = 1,9$  kN) et une même fréquence de vibration ( $f = 20$  Hz). On a fait varier l'amplitude de la vibration de 0,6 kN jusqu'à 2,5 kN. La figure 6 montre l'influence déterminante de

l'amplitude de la vibration avec des enfoncements atteints d'autant plus importants que l'amplitude de la vibration est grande. On remarque de plus, pour la dernière séquence appliquée, un enfoncement significativement plus important que pour les autres séquences. Outre le fait que l'amplitude de la vibration est ici la plus grande, cette augmentation de l'enfoncement avec le nombre de cycles appliqués peut être liée aux phases de traction présentes lors de cette sollicitation.

#### 5 INFLUENCE DES PHASES DE TRACTION SUR L'ENFONCEMENT DE LA SONDE

En vue d'étudier de manière spécifique l'influence de la présence de phases de traction sur la vibrofonçabilité de la sonde, on a réalisé les séquences d'essai présentées sur la figure 7. Les deux séquences correspondent à une même amplitude cyclique ( $F_{cyc} = 0,6$  kN) et une même fréquence de sollicitation ( $f = 30$  Hz). La première séquence a été réalisée avec une force statique initiale de 0,3 kN, induisant ainsi des phases de traction significatives (-0,3 kN), alors que la deuxième séquence, réalisée à partir d'une valeur  $F_0$  de 0,9 kN correspond à une séquence de chargement réalisée en compression uniquement. Les résultats obtenus montrent l'influence déterminante de la présence des phases de traction lors de la première séquence de vibration (malgré une valeur de  $F_0$  plus importante pour la séquence non alternée) sur l'enfoncement de la sonde, avec une vitesse d'enfoncement et un enfoncement atteints beaucoup plus importants pour la séquence comportant des phases de traction. Il est donc clair, d'après ces résultats, que l'alternance de phases de compression et de traction, qui existent effectivement lors du processus réel, joue un rôle déterminant sur le mécanisme de frottement d'interface (et sa dégradation) développé lors du processus et il pourrait être intéressant, de ce fait, de chercher à optimiser les parties du chargement en compression et celles en traction, en jouant, par exemple sur la valeur de  $F_0$ .

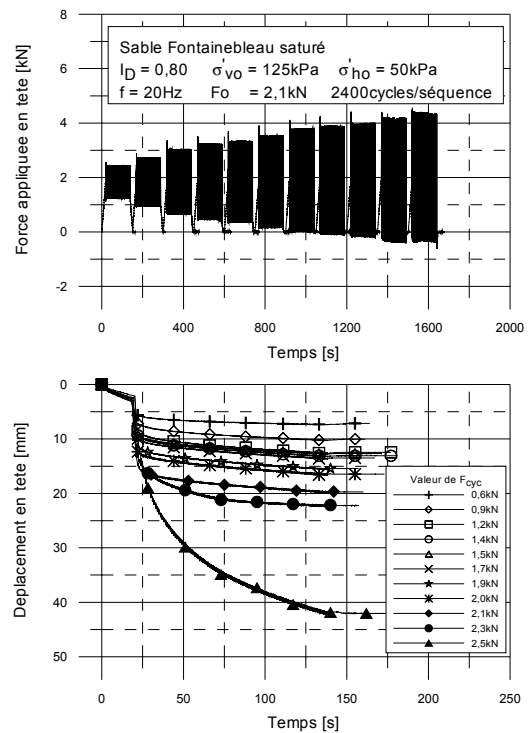


Figure 6. Influence de l'amplitude de la vibration sur l'enfoncement de la sonde de vibrofonçage

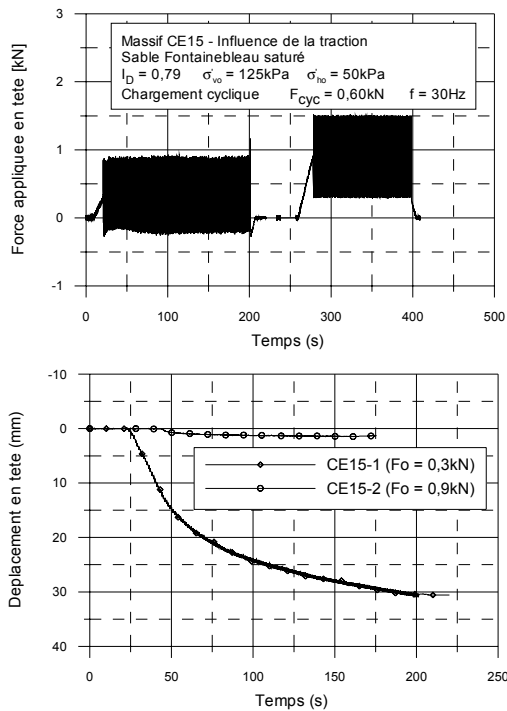


Figure 7. Influence de l'existence de phases de traction sur l'enfoncement de la sonde de vibrofonçage

## 6 CONCLUSION

Le dispositif expérimental développé et présenté dans cette communication permet de réaliser une modélisation physique du processus de vibrofonçage et de mesurer, au cours des expérimentations, l'évolution de paramètres contrôlant le développement du processus tels que le frottement local mesuré sur un manchon de frottement ou la résistance de pointe. L'intérêt de ce type d'expérimentation, sensiblement moins lourde et moins coûteuse que des essais sur site à l'échelle 1, est de permettre la réalisation d'études paramétriques ayant pour objectif de mettre en évidence l'influence de paramètres significatifs du problème, que l'on peut étudier séparément et dont on peut alors essayer de comprendre l'influence et la quantifier, ce qui apparaît être encore une tâche particulièrement importante dans le cas du processus de vibrofonçage qui est un processus complexe pour lequel existent encore beaucoup de points non élucidés. Le dispositif présenté permet d'évaluer l'influence de paramètres tels que les paramètres de la sollicitation appliquée (charge statique initiale  $F_0$ , amplitude et fréquence de la vibration) ainsi que les paramètres caractérisant l'état initial du massif (indice de densité, état et niveau de consolidation du massif, état sec ou saturé du sable) sur le déroulement du processus. On peut aussi bien sûr tester différents types de sols et étudier, par exemple, l'influence de la granulométrie d'un sable sur la vibrofonçabilité. Un autre intérêt des études du type modélisation physique en laboratoire est qu'elles peuvent permettre de mieux définir et cibler des expérimentations à concevoir et à réaliser sur site en vraie grandeur.

Les résultats présentés dans cette communication ont permis de mettre en évidence l'influence significative de l'amplitude de la vibration appliquée en tête ainsi que de l'existence des phases de traction sur le déroulement du processus, ceci montrant qu'il serait certainement possible, par un travail de perfectionnement à réaliser sur les vibreurs, d'optimiser ces paramètres et accroître ainsi les performances du procédé. Les résultats présentés

constituent cependant un premier ensemble de données qui demandent encore à être confirmées par des programmes d'essais complémentaires et il reste clair que les essais du type modélisation physique ne peuvent être extrapolés à la réalité du site qu'en prenant les précautions nécessaires pour réaliser cette extrapolation.

## REMERCIEMENTS

Les développements et les travaux présentés dans cette communication ont été réalisés dans le cadre du Projet National français consacré au vibrofonçage (projet « Vibrofonçage ») et les auteurs de la communication remercient les instances du Projet National, ainsi que les différents partenaires du Projet, pour l'environnement scientifique et le soutien financier fournis dans le cadre du développement de ces travaux.

## RÉFÉRENCES

- Canou, J. et Dupla, J.-C. 1999. Modélisation physique du processus de vibrofonçage en chambre d'étalonnage. *Document préparatoire pour le Projet National Vibrofonçage de l'IREX*, 4 p.
- Cudmani, R.O., Huber, G. and Gudehus, G. 2002. A mechanical model for the investigation of the vibrodrivability of piles in cohesionless soils; *Proceedings of Intern. Symp. on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction -TRANSVIB 2002-* Louvain-la-Neuve, 45-52.
- Gonin, H. 1998. Quelques réflexions sur le vibrofonçage. *Revue française de géotechnique*, N° 83, 35-39.
- Holeyman, A. 2002. Soil behavior under vibratory driving. *Proceedings of Intern. Symp. on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction -TRANSVIB 2002-* Louvain-la-Neuve, pp. 3-19.
- Le Thiet, T., Canou, J. et Dupla, J.-C. 2003. Modélisation physique du processus de vibrofonçage en chambre d'étalonnage. *Rapport de recherche IREX*, n°04/VBR/14, 63 p.
- Le Tirant, P., Borel, S., Couderc, C., Gonin, H., Longueval, A. Rosa, B. et Vergobbi, P. 1999. Vibrofonçage des pieux et palplanches : étude de faisabilité d'un Projet National. *Rapport Etude de l'IREX*, n°35, 26 p.
- O'Neill, M.W., Vipulanadan, C. and Wong, D., 1990. Laboratory Modeling of Vibro-Driven Piles. *Journal of Geotechnical Engineering*. Vol. 116, N° 8, 1190-1209.
- Sieffert, J.-G. 2002. Vibratory pile driving analysis. A simplified model. *Proceedings of Intern. Symp. on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction -TRANSVIB 2002-* Louvain-la-Neuve, 53-60.
- Sieffert, J.-G. and Borel, S. 2004. Toe and shaft resistance analysis during the vibratory driving of piles in Montoir. *Proceedings of the Intern. Conf. on Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, Bochum, 541-548.
- Viking, K. 2002. Vibrodrivability and induce ground vibrations of vibratory installed sheet piles. *Proceedings of Intern. Symp. on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction -TRANSVIB 2002-* Louvain-la-Neuve, 99-112.
- Vipulanadan, C., Wong, D. and O'Neill, M.W. 1990. Behavior of vibro-driven piles in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, N° 8, 1211-1230.
- Wong, D., O'Neill, M.W. and Vipulanadan, C. 1992. Modelling of vibratory pile driving in sand. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, Vol. 16, 189-210.